第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

# 疏勒河上游径流变化与预测分析

贾 玲[1]， 张百祖[2]， 牛最荣[1]， 孙栋元[1]， 孙凯悦[1]， 王鲁军[1]

（1. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省酒泉水文站，甘肃 嘉峪关 735100）

**摘 要**：采用1956—2020年疏勒河上游昌马堡水文站逐月径流量资料，选取基尼系数、洛伦兹不对称系数等8个径流年内分配特征指标，结合M-K检验、R/S分析等多种统计方法，从年内、年际综合分析疏勒河上游径流演变规律。结果表明：(1)疏勒河上游径流量年内分配呈单峰型分布，主要集中在汛期，除绝对变化幅度(ΔR)外，其余年内分配指标均呈下降趋势，表明年内分配逐渐趋向均匀；(2)年径流量总体呈增加趋势，尤其在1997年发生突变后，倾向率加大，年径流量平均值较突变前增加59%；(3)春、夏、秋、冬四季径流量总体均呈上升趋势，其中夏季倾向率最大，冬季倾向率最小；20世纪90年代发生突变后，径流量平均值较突变前均明显增加，变化幅度排序为：秋季(76%)>冬季(74%)>夏季(58%)>春季(45%)；(4)疏勒河上游年和四季径流量均具有多时间特征尺度周期，且第一主周期均为56 a；(5)对2022—2024年径流量预测显示，疏勒河上游径流量在未来3 a将继续呈上升趋势。研究结果为准确掌握疏勒河上游径流变化规律及特性提供了科学依据，对疏勒河流域水资源的可持续开发利用以及研究相似内陆河流域径流变化规律具有指导意义。

**关键词**：径流年内分配；年际变化；径流量预测；疏勒河上游

径流作为水系统结构的重要组成部分，与气候要素具有明显的相关性[1-3]。降水、气温、蒸发通过改变陆面—大气之间的水分、能量交换及传输过程，进而直接改变径流变化过程，引起水资源在时间和空间上的重新分配，加剧某些地区的洪涝或干旱灾害，引起可利用水资源的改变，进一步对生态系统、自然资源、极端气候和人类社会产生影响。径流变化在一定程度上会导致水资源量与水生态系统结构发生改变，使水资源合理规划与高效管理面临严峻挑战，因此，全面分析变化环境下径流演变规律具有一定的现实意义。

为厘清变化环境下径流演变特征，诸多学者针对一些典型流域已开展了大量工作，孙甲岚等[4]运用M-K检验、小波分析等方法系统分析了长江流域年径流量变化特征，Pan等[5]基于1951—2017年实测径流数据，采用累积距平和M-K检验对黄河流域径流变化进行了趋势性和突变性分析，邢贞相等[6]采用线性倾向、M-K检验等方法分析了挠力河径流变化特征。以上研究大多集中于径流量的年际变化特征分析，但随着气候变暖和人类活动加剧，径流变化[7-8]、冰川萎缩[9-10]、下游河流干涸等一系列问题，使得径流分布规律发生显著变化。径流年内分布情况与水资源合理利用、区域防洪抗旱联系紧密，部分学者针对年内分布规律进行了相关研究，涂新军等[11]通过集中度、集中期、不均匀系数、极值比4个指标，探讨东江径流的年内变化特征；刘永婷等[12]选取基尼系数、洛伦兹不对称系数2个年内分配指标，定量评价淮河上游径流量的年内分配均匀性。总的来说，径流变化主要包括数量和结构2种变化[13-15]。

疏勒河流域是甘肃省河西地区重要水源地之一，其上游径流量的变化关系着中、下游地区水资源的可持续性利用[16-17]。目前，诸多学者针对疏勒河上游径流变化规律开展了大量工作，张文春等[18]

**收稿日期**：2022-01-26； **修订日期**：2022-06-14

**基金项目**：甘肃省重点研发计划项目：引大灌区智慧灌溉信息监控综合处理系统研究与示范应用(21YF5FA094)；甘肃省水利厅水资源研究项目：甘肃省地热水水资源管理与保护关键技术研究(GSAU-JSZX-2020-1205)；甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目：气候变化对疏勒河上游产流影响及未来演变趋势预测分析(GSAU-JSYF-2021-016)

**作者简介**：贾玲(1998-)，女，硕士研究生，主要研究方向为水文学与水资源. E-mail: 799456567@qq.com

**通讯作者**：牛最荣. E-mail: Niuzr@gsau.edu.cn

基于昌马堡水文站的年平均径流量,分析了疏勒河上游径流量变化的趋势性特征;张晓晓等[19]以昌马堡水文站的实测径流量为研究数据,基于年内不均匀系数、变化幅度等指标,探讨了疏勒河上游径流量的年内分配规律。以往研究对疏勒河上游径流年内变化、趋势性、突变性等特征分析较为全面,但在年内分配指标选取、特征分析方法方面还可进一步补充完善。因此,本文从年内、年际两方面出发,采用M-K检验法、R/S分析法、小波分析等统计学方法综合分析疏勒河上游径流年内分配情况、趋势性、变异性、持续性及周期性,并运用灰色预测模型、R/S灰色预测模型预测未来年径流量,系统研究了径流时间变化规律,为进一步明晰环境变化下内陆河流域径流变化影响因素奠定基础。

## 1　数据与方法

### 1.1　研究区概况

疏勒河流域是甘肃省三大内陆河流域之一,以昌马水库、双塔堡水库作为上、中、下游的分界点[16-17]。疏勒河上游河段全长328 km,流域面积约为10961 km$^2$,属于干冷、多风的高原大陆性气候,多年平均径流量为10.28×10$^8$ m$^3$,冰川、积雪和冻土分布面积较广[20],区域内设有昌马堡水文站(图1)。

### 1.2　数据来源

数据来自于甘肃省酒泉水文站疏勒河上游的控制水文站——昌马堡水文站1956—2020年的实测月径流数据。文中将3—5月划分为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月—次年2月为冬季[21-22]。

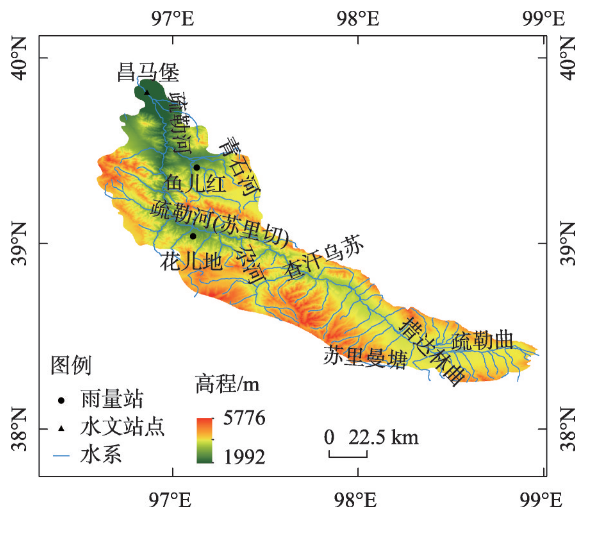



图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of study area

### 1.3　研究方法

1.3.1　年内分配分析方法　为了定量分析疏勒河上游径流演变规律,在基于月(或季)占年径流的百分比等方法分析的基础上,选取年内不均匀系数($C_v$)[23]、完全调节系数($C_r$)[24]、集中度($C_n$)[25]、集中期(D)[26]、洛伦兹不对称系数(S)[27]、基尼系数(GI)[28]、相对变化幅度($C_m$)[29]和绝对变化幅度(ΔR)[30]8个径流年内分配特征指标,从不同角度分析径流年内变化过程。

1.3.2　年际变化分析方法　运用R/S分析法、M-K检验、滑动*t*检验、线性倾向估计和小波分析等方法,从年际方面分析疏勒河上游径流量持续性、突变性、趋势性以及周期性特征[31-32]。

1.3.3　径流预测分析方法　灰色预测模型是一种优于线性回归的单序列预测模型,其序列表达式为一阶线性微分方程[33-34]。由于径流变化具有突变性,为了提高预测精度,提出了R/S灰色预测模型[35-36],其计算原理为:(1) 根据R/S分析法,确定序列平均循环周期$t$;(2) 以$N=t-1$为研究周期建立灰色预测模型,预测$N+1$年径流量;(3) 对模型进行残差检验,若通过,则依次类推,继续预测下一年径流量。ARIMA模型是将ARMA模型与差分运算结合的组合预测模型,又称为差分整合移动平均自回归模型[37],记为ARIMA($p,d,q$),其中$p$为自回归项数,$d$为序列平稳时的差分次数,$q$为滑动平均项数[38]。

## 2　结果与分析

### 2.1　径流年内分配特征

2.1.1　年内分配情况　疏勒河流域是典型的内陆河流域,其主要补给来源为降水和冰川融雪。由图2a可知,昌马堡站径流量呈单峰型分布,冬季处于低值;春季气温回升,降水和融雪增加,径流量呈上升趋势;夏季汛期来临,径流量急剧上升,在8月达到最大值;秋季气温降低,径流量呈缓慢下降趋势,至12月回落到常态。结合图2b可知,在各年代内分配上,径流主要集中在汛期7—8月,占多年平均值的49.23%~53.29%;2010s、2000s、1980s、1950s的月最大径流主要出现在7月,分别占多年平均值的24.20%、24.43%、23.74%和27.97%;1990s、1970s、1960s的月最大径流主要出现在8月,分别占多年平均值的25.35%、26.60%和24.74%。

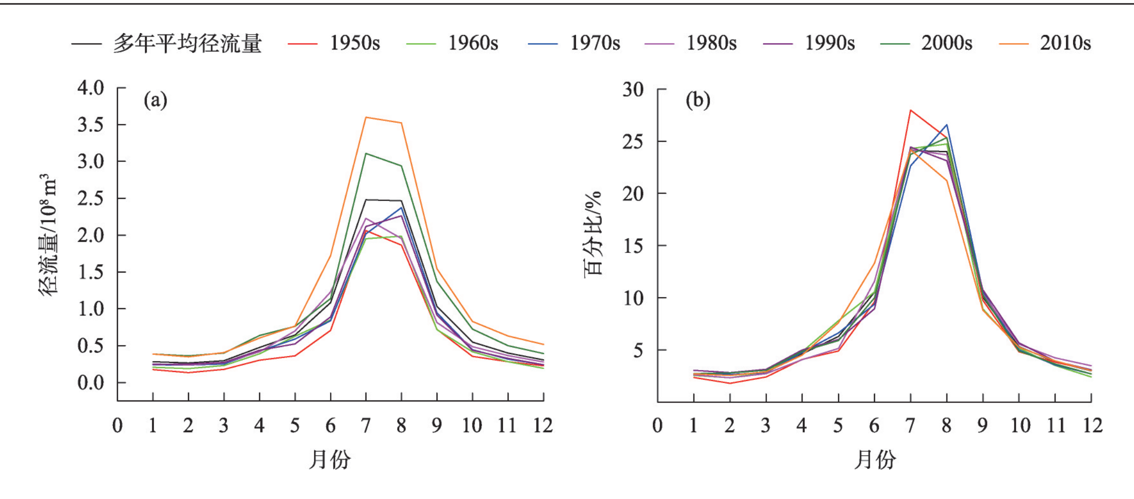



图2 疏勒河上游径流年内分配过程

Fig. 2 Annual distribution process of runoff in the upper reaches of the Shule River



由表1可知，疏勒河上游多年平均径流量为$10.28\times10^8$ m$^3$，各时段径流呈持续增加状态，2010s时段径流量较1950s增加了1倍多。全年均保持上升趋势，其中，四季占各时段均值的具体排序为：夏季(56.50%~62.91%)>秋季(17.60%~20.39%)>春季(11.41%~15.48%)>冬季(7.25%~8.97%)。总体上，基于径流上升的大趋势，全年径流集中在夏秋季，且一直存在夏季径流比例偏大、春季径流比例偏小的现象。

2.1.2 年内分配特征 受气候变化和人类活动的影响，疏勒河上游水循环发生了明显的季节性变化，进而导致流域径流年内分配不均匀性发生改变。由表2可知，$C_v$、$C_r$、$C_n$、D分别以$-0.015\cdot(10a)^{-1}$、$-0.006\cdot(10a)^{-1}$、$-0.006\cdot(10a)^{-1}$、$-1.053\cdot(10a)^{-1}$的速

表1 径流年内各季分配

Tab. 1 Seasonal distribution of runoff during the year

| 时段 | 径流量/$10^8$ m$^3$ | 春季(3—5月) | | 夏季(6—8月) | | 秋季(9—11月) | | 冬季(12月—次年2月) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 径流量/$10^8$ m$^3$ | 百分比/% | 径流量/$10^8$ m$^3$ | 百分比/% | 径流量/$10^8$ m$^3$ | 百分比/% | 径流量/$10^8$ m$^3$ | 百分比/% |
| 1950s | 7.37 | 0.84 | 11.41 | 4.63 | 62.91 | 1.36 | 18.43 | 0.53 | 7.25 |
| 1960s | 8.03 | 1.24 | 15.48 | 4.79 | 59.60 | 1.41 | 17.60 | 0.59 | 7.32 |
| 1970s | 8.92 | 1.27 | 14.22 | 5.23 | 58.61 | 1.71 | 19.14 | 0.72 | 8.04 |
| 1980s | 9.22 | 1.38 | 15.00 | 5.41 | 58.68 | 1.66 | 18.02 | 0.76 | 8.29 |
| 1990s | 8.92 | 1.23 | 13.83 | 5.27 | 59.08 | 1.68 | 18.83 | 0.74 | 8.26 |
| 2000s | 12.72 | 1.80 | 14.14 | 7.19 | 56.50 | 2.59 | 20.39 | 1.14 | 8.97 |
| 2010s | 14.87 | 1.78 | 11.94 | 8.84 | 59.47 | 3.00 | 20.18 | 1.25 | 8.41 |
| 多年平均值 | 10.28 | 1.42 | 13.82 | 6.03 | 58.64 | 1.98 | 19.26 | 0.85 | 8.28 |

表2 疏勒河上游径流年内分配特征指标

Tab. 2 Intra-year distribution characteristics of runoff in the upper reaches of the Shule River

| 统计值 | $C_v$ | $C_r$ | $C_n$ | D | GI | S | $C_m$ | ΔR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 倾向率/$(10a)^{-1}$ | −0.015 | −0.006 | −0.006 | −1.053 | −0.009 | −0.006 | −0.643 | 0.255 |
| 最大值 | 1.27 | 0.66 | 0.66 | 276.48 | 0.49 | 1.09 | 32.20 | 5.66 |
| 最大值出现年份 | 1976 | 1976 | 1958 | 1987 | 1991 | 1975 | 1958 | 2016 |
| 最小值 | 0.68 | 0.26 | 0.39 | 181.23 | 0.29 | 0.72 | 6.81 | 0.70 |
| 最小值出现年份 | 1973 | 1984 | 2003 | 1969 | 2020 | 2019 | 1973 | 1956 |
| 平均值 | 0.93 | 0.36 | 0.52 | 197.42 | 0.39 | 0.84 | 12.16 | 2.54 |

率下降,在不考虑2016年和1956年极值的情况下,$C_m$和ΔR也呈下降趋势,即年内最大月径流量和最小月径流量的差值不断减小,从不均匀性、集中度、变化幅度等方面来看,疏勒河上游年内分配趋向均匀;65 a中GI均分布在0.29~0.49之间,其中有40 a GI值小于0.4,自2010年以来,GI值一直小于0.4,表明疏勒河上游年内分配趋向均匀;65 a的S大都小于1,表明径流年内分配不均匀的原因可能是径流量较小的月份造成的。

**2.2　径流持续性、突变性分析**

Hurst指数可以定量表征时间序列的长期相关性,其值大小可作为时间序列是否存在趋势性成分的依据,一般通过R/S分析计算Hurst指数值。结合图3和表3可知,疏勒河上游年径流量和四季径流量的Hurst指数均大于0.5,表现为正持续性,其中,除夏季径流量的Hurst指数为0.7353,年径流量、春季径流量、秋季径流量和冬季径流量的Hurst指数均远远大于0.5,表现出很强的正持续性,表明未来疏勒河上游径流量将继续保持上升趋势。

由M-K检验(图4a)可知,$UF_K$和$UB_K$在95%置信区间内存在交点(1997年),表明1997年为疏勒河上游年径流量的突变点;采用10 a滑动$t$检验(图4b)分析,得到年径流量在20世纪90年代末发生突变;综合考虑以上2种突变分析方法检验结果,可认为疏勒河上游年径流量在1997年发生突变。由表3可知,疏勒河上游春季、夏季、秋季和冬季的突变年份分别为1999年、1998年、1997年和1999年。

**2.3　径流趋势性分析**

由图5a可知,疏勒河上游年平均径流量为$10.28\times10^8$ m³,最大值为$17.44\times10^8$ m³,出现在2017年,最小值为$4.13\times10^8$ m³,出现在1956年。结合表4进一步分析,年径流量变化趋势通过了0.05显著性水平,总体上以$1.21\times10^8$ m³·(10a)$^{-1}$的速率显著上升,且年径流量在突变后较突变前增加了59%。由图5b可知,1997年前,年平均径流量累积距平值呈下降趋势,年平均径流量呈下降趋势;1997年后,年平均径流量累积距平值呈上升趋势,年平均径流量呈逐步上升趋势且上升速率较快,这与突变检验结果相一致,再一次印证疏勒河上游年径流量在1997年发生了突变。

结合图6和表4分析可知,疏勒河上游四季径流量均通过了0.05的显著性检验,总体均呈现上升趋势。其中,夏季变化幅度最大,倾向率为0.66·(10a)$^{-1}$,秋季次之,倾向率为0.29·(10a)$^{-1}$,春季再次,倾向率为0.14·(10a)$^{-1}$,冬季增幅最小,气候倾向率为0.13·(10a)$^{-1}$。由表4可知,夏季、秋季、冬季突变

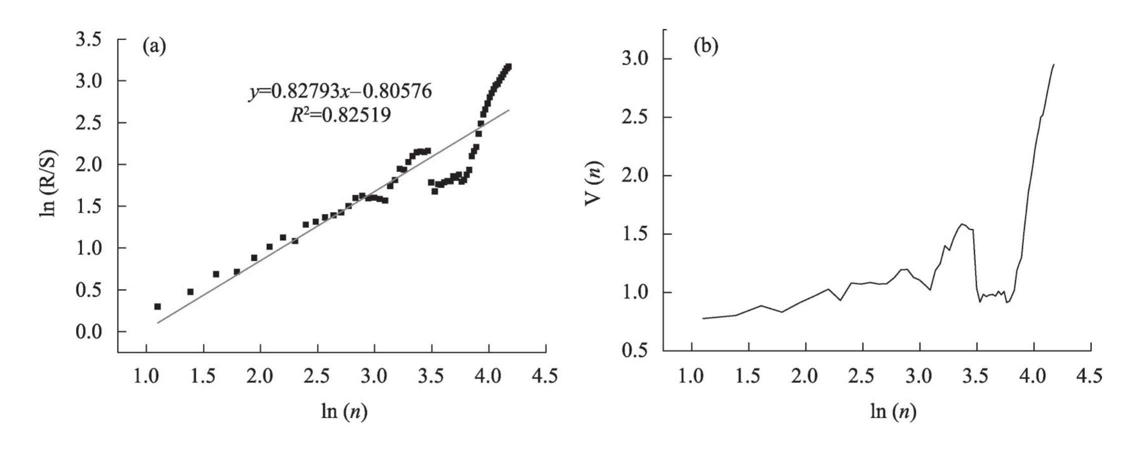



图3　疏勒河上游年径流量的R/S分析结果

Fig. 3　R/S analysis results of annual runoff in the upper reaches of the Shule River

**表3　疏勒河上游年和四季径流量持续性、突变性分析结果**

**Tab. 3　Analysis results of annual and four-season runoff persistence and mutation in the upper reaches of the Shule River**

| 1956—2020年径流序列 | | 年 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 持续性分析 | Hurst指数 | 0.8279 | 0.8127 | 0.7353 | 0.8155 | 0.9422 |
| | 拟合$R^2$ | 0.8252 | 0.9690 | 0.6802 | 0.8846 | 0.9738 |
| 突变性分析 | 突变年份 | 1997 | 1999 | 1998 | 1997 | 1999 |

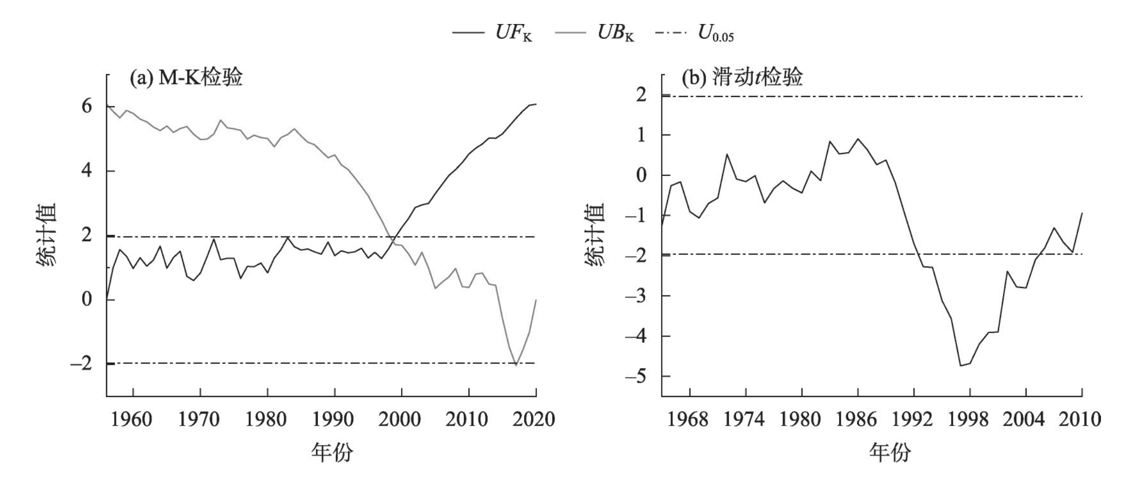



图4 疏勒河上游年径流量突变性分析

Fig. 4 Analysis on the mutation of annual runoff in the upper reaches of Shule River

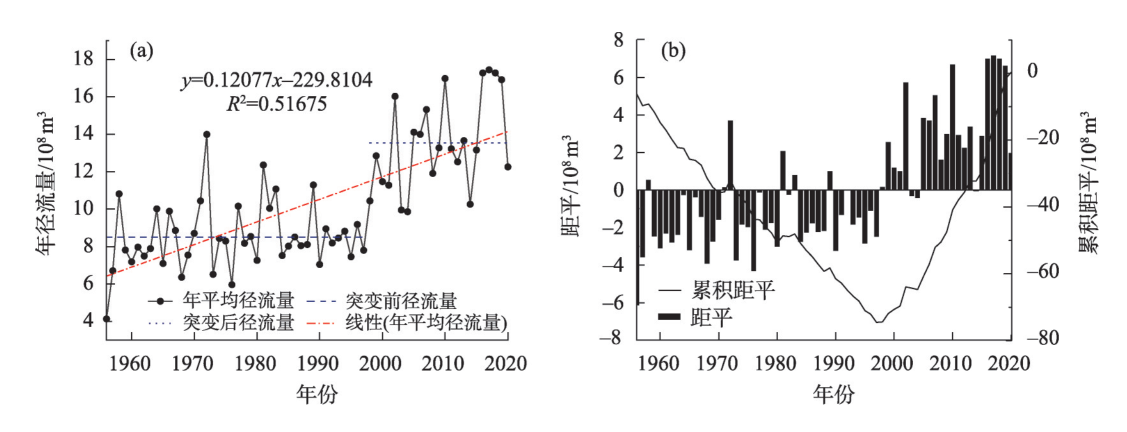



图5 疏勒河上游年径流量趋势线和距平

Fig. 5 Trend lines and anomalies of annual runoff in the upper reaches of the Shule River

后径流量的变差系数均小于突变前，表明突变后径流量变异性较小，且四季突变后的径流量均值较突变前大幅增加，具体排序为：秋季(76%)>冬季(74%)>夏季(58%)>春季(45%)。

### 2.4 径流周期性分析

由图7a方差图可知，疏勒河上游年径流量存在3个主周期，分别为56 a、28 a和10 a，其中56 a为第一主周期。结合图7b实部图进一步分析，对于56 a的特征时间尺度，存在2个明显的丰水期中心和1个枯水期中心，对应年份分别为1974年、2010年和1989年，经历了1个丰枯转化期。28 a尺度上存在3个丰水期中心和3个枯水期中心，经历了3个丰枯转化期，其中丰水期中心为1967年、1985年和2004年，枯水期中心为1975年、1994年和2013年。10 a尺度上经历了大约10个丰枯转化期，丰枯交替频繁。由表5可知，疏勒河上游四季均存在多个时间尺度特征，春季的第一、二和第三主周期分别为56 a、28 a和20 a，夏季的第一、第二和第三主周期分别为56 a、28 a和9 a，秋季径流的第一、二主周期分别为56 a和13 a，冬季径流的第一主周期为56 a。

### 2.5 径流量预测分析

用1956—2021年疏勒河上游实测年径流量资料，分别构建灰色预测模型、R/S灰色预测模型、ARIMA模型，以2019—2021年为验证阶段，预测2022—2024年径流量，分析结果见表6。综合考虑3种模型的预测效果，最终以综合预测值作为2022—2024年径流量预测值，分别为15.49×$10^8$ $m^3$、15.53×$10^8$ $m^3$、15.67×$10^8$ $m^3$。

## 3 讨 论

疏勒河上游位于祁连山区，受人类活动干扰较小，径流量总体呈上升趋势，本研究基于1956—

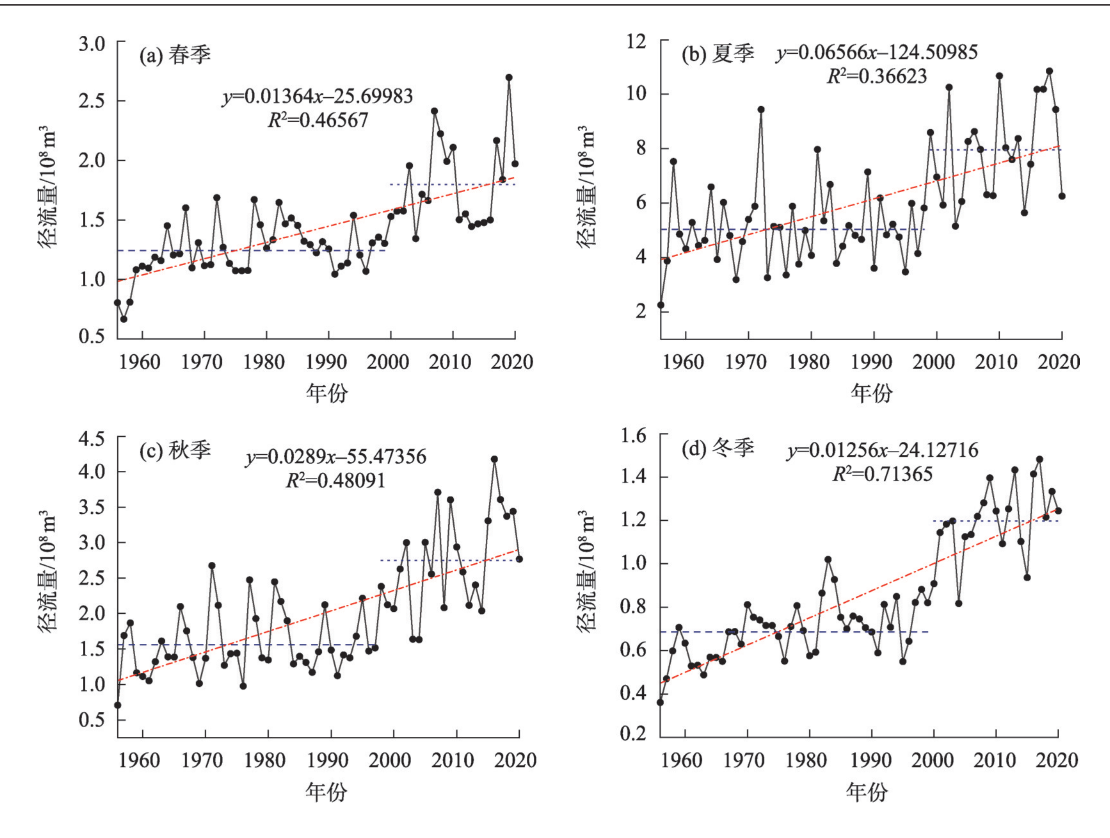



图6 疏勒河上游四季径流量趋势分析

Fig. 6 Analysis on the trend of runoff in four seasons in the upper reaches of Shule River

**表4 疏勒河上游径流量趋势分析**

**Tab. 4 Analysis of runoff trend in the upper reaches of the Shule River**

| 1956—2020年径流序列 | 统计特征 | | 趋势检验 | | | 突变点前 | | 突变点后 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 均值/$10^8 m^3$ | 变差系数 | 倾向率 | M-K检验值 | 显著性 | 均值/$10^8 m^3$ | 变差系数 | 均值/$10^8 m^3$ | 变差系数 |
| 年 | 10.28 | 0.31 | 1.21 | 6.0633 | 是 | 8.50 | 0.21 | 13.54 | 0.18 |
| 春季 | 1.42 | 0.26 | 0.14 | 5.8482 | 是 | 1.24 | 0.18 | 1.80 | 0.20 |
| 夏季 | 6.03 | 0.34 | 0.66 | 5.0386 | 是 | 5.04 | 0.27 | 7.96 | 0.22 |
| 秋季 | 1.98 | 0.40 | 0.29 | 5.7463 | 是 | 1.56 | 0.28 | 2.75 | 0.25 |
| 冬季 | 0.85 | 0.33 | 0.13 | 7.6825 | 是 | 0.69 | 0.18 | 1.20 | 0.14 |

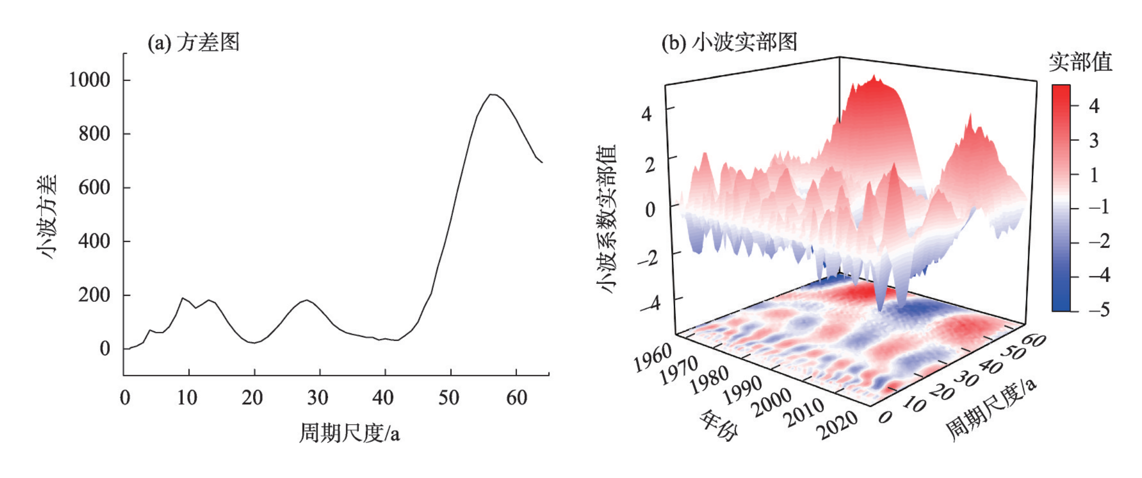



图7 疏勒河上游年径流量小波周期分析

Fig. 7 Wavelet period analysis of annual runoff in the upper reaches of the Shule River

表5 疏勒河上游年、四季周期统计

Tab. 5 Annual and four-season cycles in the upper reaches of the Shule River

| 1956—2020年径流序列 | 第一主周期 | 第二主周期 | 第三主周期 |
|---|---|---|---|
| 年 | 56 a | 28 a | 10 a |
| 春季 | 56 a | 28 a | 20 a |
| 夏季 | 56 a | 28 a | 9 a |
| 秋季 | 56 a | 13 a | – |
| 冬季 | 56 a | – | – |

2020年昌马堡水文站逐月径流量分析径流演变特征，发现研究时段内，春、夏、秋、冬四季年径流量总体均呈上升趋势，其中夏季上升趋势最高，冬季上升趋势最低。丁宏伟等[39]以傅里叶公式为基础的频谱分析方法发现，疏勒河上游1952—1999年径流量以6 a、11 a和3 a周期变化最为显著；本研究通过小波分析方法发现，1956—2020年径流量最显著的周期为56 a、28 a和10 a。由于选取研究时段的序列长度不一致或采用方法不同，会导致分析结果有所不同；且径流具有随机性、突变性、非线性等复杂特性[40]，仅用一种方法分析会造成结果的局限性和不确定性，不利于全面认识环境变化下径流演变规律。

此外，基于疏勒河上游径流的年内不均匀系数($C_v$)、完全调节系数($C_r$)、集中度($C_n$)、集中期(D)、相对变化幅度($C_m$)和绝对变化幅度(ΔR)6个指标，增加了洛伦兹不对称系数(S)和基尼系数(GI)2个指标分析径流量对均匀性的贡献程度后，发现除绝对变化幅度外，其余分配指标均呈下降趋势。在不考虑极值时，绝对变化幅度也呈下降趋势，进一步说明年内分配过程逐渐趋向均匀。采用灰色预测模型、R/S灰色预测和ARIMA模型分别预测未来疏勒河上游年径流量，发现灰色预测模型的相对误差最小，但若遇到突变年份，就会造成较大的误差。考虑径流变化具有周期性，通过R/S分析方法确定循环周期$T$，以$T$−1为研究序列进行灰色预测，但是R/S灰色预测模型与研究序列的波动性和跳跃性有关，跳跃性越强、波动性越大，其预测精度就越小。

表6 疏勒河上游年径流量预测结果

Tab. 6 Prediction results of annual runoff in the upper reaches of the Shule River

| 年份 | 实测值/$10^8 m^3$ | 灰色预测模型 | | R/S灰色预测模型 | | ARIMA模型 | | 综合预测值/$10^8 m^3$ | 综合相对误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 预测值/$10^8 m^3$ | 相对误差/% | 预测值/$10^8 m^3$ | 相对误差/% | 预测值/$10^8 m^3$ | 相对误差/% | | |
| 2019 | 16.91 | 13.92 | −17.69 | 16.28 | −3.69 | 15.73 | −6.96 | 15.31 | −9.46 |
| 2020 | 12.25 | 14.04 | 14.59 | 16.81 | 37.23 | 15.88 | 29.61 | 15.58 | 27.18 |
| 2021 | 14.03 | 14.16 | 0.89 | 17.06 | 21.57 | 16.02 | 14.16 | 15.75 | 12.26 |
| 2022 | | 14.33 | | 16.89 | | 15.26 | | 15.49 | |
| 2023 | | 14.45 | | 16.74 | | 15.39 | | 15.53 | |
| 2024 | | 14.57 | | 16.94 | | 15.51 | | 15.67 | |
| 平均相对误差/% | | | 11.06 | | 20.83 | | 16.91 | | 16.30 |

因此，本文采用ARIMA等单变量预测模型，主要是根据径流自身变化规律进行预测分析，未能考虑降雨、气温等气象条件对径流变化的影响，使得预测值与实测值之间存在一定的误差，故今后需要继续开展多变量预测模型等相关内容的研究。

## 4 结 论

本研究基于疏勒河上游昌马堡水文站1956—2020年月径流数据，研究径流变化特征，分析结果如下：

(1) 疏勒河上游径流量基尼系数、洛伦兹不对称系数等年内分配指标均呈下降趋势，表明年内分配过程逐渐趋向均匀，主要是因为气温升高导致枯水季节径流量增加，进而在一定程度上调节了径流年内分配均匀度。

(2) 年、春、夏、秋、冬径流量在20世纪90年代末发生突变后，径流量平均值较突变前分别增加了59%、45%、58%、76%、74%，这与近年来降水增加、气温升高造成冰雪径流量增加密切相关。

(3) 疏勒河上游年和四季径流量均具有多时间

特征尺度周期。其中,第一主周期均为56 a,年径流量、春季径流量和夏季径流量的第二主周期均为28 a。

(4)研究期内,疏勒河上游年径流量、四季径流量均呈上升趋势,经综合预测,疏勒河上游径流量在未来3 a继续呈上升趋势,预测值分别为15.49×$10^8$ $m^3$、15.53×$10^8$ $m^3$、15.67×$10^8$ $m^3$。

## 参考文献(References):


[1] 孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 113-122. [Sun Congjian, Chen Wei, Wang Shiyu. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim Basin under regional climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 113-122. ]

[2] 杨盼, 梁伟, 严建武, 等. 黄河流域多尺度水系统结构变化特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 223-234. [Yang Pan, Liang Wei, Yan Jianwu, et al. Multi-scale analysis of water system structure changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021, 14(6): 223-234. ]

[3] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 水文, 2012, 32(2): 78-83, 87. [Niu Zuirong, Zhao Wenzhi, Liu Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River Basin in Gansu[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2): 78-83, 87. ]

[4] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 1-4. [Sun Jialan, Lei Xiaohui, Jiang Yunzhong, et al. Variation trend analysis of meteorological variables and runoff in upper reaches of Yangtze River [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 1-4. ]

[5] Pan B , Han M , Wei F , et al. Analysis of the variation characteristics of runoff and sediment in the Yellow River within 70 years[J]. Water Resources, 2021, 48(5): 676-689.

[6] 邢贞相, 刘美鑫, 付强, 等. 挠力河流域径流变化特征与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 178-187. [Xing Zhenxiang, Liu Meixin, Fu Qiang, et al. Analysis of runoff vriation and impacting factors in Naoli River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 178-187. ]

[7] 刘志斌, 黄粤, 刘铁, 等. 开都河源区径流变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 418-427. [Liu Zhibin, Huang Yue, Liu Tie, et al. Climate response of runoff variation in the source area of the Kaidu River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 418-427. ]

[8] 刘爽爽, 李忠勤, 张慧, 等. 天山典型冰川区径流年内变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1388-1395. [Liu Shuangshuang, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Temporal inner-annual runoff variation in the variation in the typical glacier region of the eastern Tianshan Mountains, China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1388-1395. ]

[9] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An Overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483-493. ]

[10] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304. ]

[11] 涂新军, 陈晓宏, 张丽娟, 等. 时段长取值变化下的径流年内分配特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 119-123. [Tu Xinjun, Chen Xiaohong, Zhang Lijuan, et al. Annual distribution of streamflow with different identifications of time intervals[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 119-123. ]

[12] 刘永婷, 徐光来, 李鹏, 等. 淮河上游径流年内分配均匀度及变化规律[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 99-104. [Liu Yongting, Xu Guanglai, Li Peng, et al. Study on runoff uniformity and variation in the upper reaches of Huaihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 99-104. ]

[13] 陈贤光, 王龙, 张玉龙. 龙川江径流年内分配及变化趋势研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2011, 26(5): 712-716. [Chen Xianguang, Wang Long, Zhang Yulong. Study on change trend of annual runoff distribution in Longchuan River[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science Edition), 2011, 26(5): 712-716. ]

[14] 周秀平, 黄伟军, 王文圣. 桂江流域径流变化特性分析[J]. 广西水利水电, 2008, 37(1): 22-25, 39. [Zhou Xiuping, Huang Weijun, Wang Wensheng. Runoff variation characteristics analysis for Guijiang River Basin[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2008, 37(1): 22-25, 39. ]

[15] 郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 585-590, 649. [Zheng Hongxing, Liu Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22 (6): 585-590, 649. ]

[16] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 907-917. [Li Hongyuan, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 907-917. ]

[17] 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958—2015年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1894-1899. [Yang Chunli, Lan Yongchao, Wang Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River Basin in 1958-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(12): 1894-1899. ]

[18] 张文春. 疏勒河干流中上游径流量变化趋势研究[J]. 地下水, 2019, 41(2): 155-156, 211. [Zhang Wenchun. Study on the change trend of runoff in the middle and upper reaches of the main stream of Shule River[J]. Ground Water, 2019, 41(2): 155-156, 211. ]

[19] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 疏勒河上游径流年内分配变化规律分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(6): 58-60. [Zhang Xiaoxiao, Zhang Yu, Xu Haojie. Changes of annual runoff distribution on the upper reaches of the Shule River[J]. Yellow River, 2014, 36(6): 58-60. ]

[20] 蓝永超, 胡兴林, 丁宏伟, 等. 气候变暖背景下祁连山西部山区水循环要素的变化——以疏勒河干流上游山区为例[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 675-680. [Lan Yongchao, Hu Xinglin, Ding Hongwei, et al. Variation of water cycle factors in the western Qilian Mountain Area under climate warming-taking the mountain watershed of the main stream of Shule River Basin for example[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(6): 675-680. ]

[21] 贾玲, 孙栋元, 牛最荣, 等. 疏勒河流域最高、最低气温变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 281-287. [Jia Ling, Sun Dongyuan, Niu Zuirong, et al. Pattern of maximum and minimum temperature variation in Shule River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 281-287. ]

[22] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557-567. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Ma Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 557-567. ]

[23] 曹振宇. 穆棱河流域上游径流年内分配特性[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 21-25. [Cao Zhenyu. Variation regularity of intra-annual runoff distribution in the upstream of the Muling River Basin [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 21-25. ]

[24] 张晓晓. 白龙江中上游水文气象要素变化特征分析及径流影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Zhang Xiaoxiao. Variation Characteristics Analysis of Hydrometeorology Elements and Affecting Factors of Runoff in the Middle-Upper rReaches of the Bailong River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. ]

[25] 叶正伟, 殷鹏. 淮河流域汛期候尺度降水集中度与集中期的时序变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 295-299. [Ye Zhengwei, Yin Peng. Changes of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in flood season in the Huaihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (5): 295-299. ]

[26] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. 地理学报, 1982, 48(4): 383-393. [Tang Qicheng, Chen Tianwen, Li Xiuyun. Concentration and monthly runoff of Chinese rivers preliminary study during the concentration period [J]. Acta Geographica Sinica, 1982, 48(4): 383-393. ]

[27] 徐万玲, 朱卫红, 张健, 等. 基于洛伦兹曲线的图们江干流区间径流分布不均匀性分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 128-132. [Xu Wanling, Zhu Weihong, Zhang Jian, et al. Analysis on temporal inhomogenenity of runoff in Tumen River mainstream based on Lorenz Curve[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 128-132. ]

[28] 胡彩霞, 谢平, 许斌, 等. 基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法——以东江流域龙川站径流序列为例[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 7-13. [Hu Caixia, Xie Ping, Xu Bin, et al. Variation analysis method for hydrologic annual distribution homogeneity based on Gini coefficient. A case study of runoff series at Longchun station in Dongjiang River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 7-13. ]

[29] 侯凯, 林涛, 钱会, 等. 武功地区气候变化特征及趋势预测[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 252-258. [Hou Kai, Lin Tao, Qian Hui, et al. Change characteristics and trend prediction of climate in Wugong Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 252-258. ]

[30] 黄济琛, 陆宝宏, 范仲丽, 等. 清江流域降水径流年内分配特征及其同步性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 25-30. [Huang Jichen, Lu Baohong, Fan Zhongli, et al. Analysis of annual distribution of precipitation and runoff and synchronism of their variation in Qingjiang Basin[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences Edition), 2017, 39(6): 25-30. ]

[31] 牛最荣, 王启优, 孙栋元, 等. 基于径流还现的洮河流域径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 149-157. [Niu Zuirong, Wang Qiyou, Sun Dongyuan, et al. Runoff variation characteristics of Taohe River Basin based on calculation of current runoff[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 149-157. ]

[32] 牛最荣, 陈学林, 王学良. 白龙江干流代表站径流变化特征及未来趋势预测[J]. 水文, 2015, 35(5): 91-96. [Niu Zuirong, Chen Xuelin, Wang Xueliang. Runoff variation characteristics of representative stations on mainstream of Bailongjiang River and trend prediction[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(5): 91-96. ]

[33] 刘树, 王燕, 胡凤阁. 对灰色预测模型残差问题的探讨[J]. 统计与决策, 2008, 14(1): 9-11. [Liu Shu, Wang Yan, Hu Fengge. Discussion on residual error of grey prediction model[J]. Statistics & Decision, 2008, 14(1): 9-11. ]

[34] 曹辉, 黄强, 白涛, 等. 径流预测方法对比分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 36-37. [Cao Hui, Huang Qiang, Bai Tao, et al. Comparative analysis of runoff forecasting methods[J]. Yellow River, 2009, 31(9): 36-37. ]

[35] 陈建龙, 刘永峰, 钱鞠, 等. R/S分析法与GM(1,1)灰色模型相结合的鸳鸯池水库入库径流量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 148-153,158. [Chen Jianlong, Liu Yongfeng, Qian Ju, et al. Annual runoff inflow into Yuanyangchi reservoir prediction based on the combination of R/S analysis and GM(1, 1) grey model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 148-153, 158. ]

[36] 李建林, 昝明军, 李宝玲. 基于R/S分析的黑河出山年径流量灰色预测[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(5): 127-131. [Li Jianlin, Zan Mingjun, Li Baoling. Grey prediction of out-mountainous annual runoff of Heihe River based on R/S analysis[J]. Areal Re-

search and Development, 2014, 33(5): 127-131.]

[37] 李福兴. 玛纳斯河径流演变特性及其中长期径流预报模型研究[D]. 石河子:石河子大学, 2021. [Li Fuxing. Study on Manas River Runoff Evolution Characteristics and Its Medi and Long-term Forecast Model[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. ]

[38] 李福兴, 陈伏龙, 蔡文静, 等. 基于EMD组合模型的径流多尺度预测[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 428-437. [Li Fuxing, Chen Fulong, Cai Wenjing, et al. Multiscale runoff prediction based on the EMD combined model[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 428-437. ]

[39] 丁宏伟, 魏余广, 李爱军, 等. 疏勒河出山径流量变化特征及趋势分析[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 48-53. [Ding Hongwei, Wei Yuguang, Li Aijun, et al. The change characteristics and the trend prediction of streamflow at the debouchure of Shulehe River[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(3): 48-53. ]

[40] 郭生练, 郭家力, 侯雨坤, 等. 基于Budyko假设预测长江流域未来径流量变化[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 151-160. [Guo Shenglian, Guo Jiali, Hou Yukun, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 151-160. ]

# Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River

JIA Ling[1], ZHANG Baizu[2], NIU Zuirong[1], SUN Dongyuan[1], SUN Kaiyue[1], WNAG Lujun[1]

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Jiuquan Hydrological Station of Gansu Province, Jiayuguan 735100, Gansu, China)

**Abstract:** A quantitative analysis of runoff variation characteristics is the basis for finding out its impact mechanism, and it is also an important basis for accurately evaluating water resources. This study used eight annual distribution indexes, such as the Gini coefficient and Lorentz asymmetry coefficient, combined with the M-K test、R/S analysis, and other mathematical statistics methods, to comprehensively analyze the process of the runoff of the upper reaches of the Shule River from the annual and interannual levels. The results showed that the following: (1) during the year, a unimodal distribution was shown, which was mainly concentrated in the flood season concentration degree (D), inhomogeneous coefficient ($C_v$), Gini coefficient (GI), relative change range ($C_m$) decreased respectively at the rate of $-1.053\cdot(10a)^{-1}$, $-0.015\cdot(10a)^{-1}$, $-0.009\cdot(10a)^{-1}$, $-0.643\cdot(10a)^{-1}$, complete adjustment coefficient ($C_r$), Lorentz asymmetry coefficient (S), concentration period ($C_n$) all decreased at the rate of $-0.006\cdot(10a)^{-1}$. The distribution tended to be uniform gradually according to the changing trend of its characteristic index during the year. (2) The annual runoff showed an overall increasing trend, but an abrupt change occurred in 1997, and the average annual runoff afterward increased by 59% compared before the change. (3) The runoff generally showed an upward trend in all four seasons, among which the trend rate was the greatest in the summer and the smallest in the winter. After the abrupt change in the 1990s, the average runoff increased significantly compared to before the abrupt change, and the change range was in the following order: autumn (76%) > winter (74%) > summer (58%) > spring (45%). (4) The annual and seasonal runoff in the upper reaches of the Shule River had multiple time characteristic scale periods, and the first major cycle were both 56 years. (5) According to the predicted runoff from 2022 to 2024, it was found that the runoff of the upper reaches of the Shule River will continue to increase in the next three years. These results provided a scientific basis for accurately grasping the runoff variation laws and characteristics of the upper reaches of the Shule River and had certain guiding significance for the sustainable development and utilization of water resources in the Shule River Basin and the study of the runoff variation laws in inland river basins.

**Keywords:** runoff seasonal distribution; inter-annual variation; runoff forecast; upper reaches of the Shule River